

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.373, 681.069

## НАНО- И СУБНАНОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ И СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2010 г. С. Г. Гаранин, член-корр. РАН; Б. Г. Зималин; В. В. Романов;  
Н. Н. Рукавишников, канд. физ.-мат. наук; С. В. Соколовский;  
С. А. Сухарев, доктор физ.-мат. наук; О. В. Триканова

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, федеральный ядерный центр, г. Саров, Нижегородская обл.

E-mail: garanin@vniief.ru

Разработана и экспериментально опробована лазерная система, генерирующая нано- и субнаносекундные лазерные импульсы с временным и спектральным профилированием. Принцип работы системы основан на селекции спектральных компонент в устройстве растяжения фемтосекундных лазерных импульсов до единиц наносекунд и спектрального упорядочения излучения (стретчере). Экспериментально получены лазерные импульсы с крутыми (менее 100 пс) передними и задними фронтами. Исследовано усиление таких импульсов в регенеративном усилителе с физическим коэффициентом усиления  $6 \times 10^{17}$  до уровня энергии  $\approx 5$  мДж.

**Ключевые слова:** фемтосекундные импульсы, стретчер, спектральное профилирование.

Коды OCIS: 050.1590, 320.0320

Поступила в редакцию 30.05.2010

В современных лазерных установках, предназначенных для исследований в области управляемого термоядерного синтеза и взаимодействия оптического излучения с веществом, как правило, необходима заданная (профилированная) временная форма лазерного импульса, действующего на мишени [1–4]. При этом желательно иметь возможность оперативного изменения временного профиля лазерного импульса при проведении экспериментов. Кроме того, для подавления поперечного ВРМБ в большепертурных оптических элементах на выходе установки и задействования методик однородного облучения мишени (например – SSD – smoothing by spectral dispersion) необходим широкий, вплоть до единиц нанометров, спектральный состав излучения [5, 6].

Эти требования на установках NIF, LMJ и OMEGA реализуются путем временного профилирования и фазовой модуляции лазерного импульса в стартовой системе [5–10]. Разработанные для этих установок фазовые и амплитудные модуляторы базируются на специфических интегрально-оптических устройствах и средствах их управления.

Возможность управления временной и спектральной формами лазерного импульса заключается в модуляции амплитуд спектральных компонентов с помощью транспаранта, помещенного в стретчере – устройстве, осуществляющем временное растяжение и спектральную упорядоченность сверхкороткого лазерного импульса. Ранее такой способ применялся для управления амплитудами и фазами спектральных компонент при компрессии чирпированных лазерных импульсов [11].

Современные задающие генераторы сверхкоротких лазерных импульсов излучают спектрально ограниченные импульсы длительностью в десятки и сотни фемтосекунд. Так как сверхкороткие импульсы обладают широким спектром (для длины волны излучения  $\lambda = 1054$  нм и длительности импульса  $\tau \approx 200$  фс ширина спектра составляет  $\Delta\lambda \approx 8,3$  нм), то их временное растяжение и спектральное упорядочение (чирпирование) легко осуществляются в дисперсионной системе (стретчере) на основе одной или нескольких дифракционных решеток [11, 12]. Типичная схема линзового двухпроходного стретчера, применяемая в наших экспериментах, показана на рис. 1.

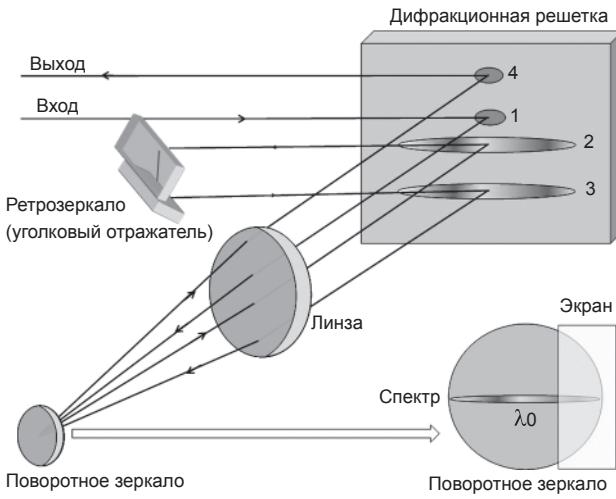


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема стретчера.

Идея временного профилирования импульса излучения заключается в следующем. На разложенном в спектр пучке после первого отражения от дифракционной решетки вблизи поворотного зеркала со стороны более длинноволновых спектральных компонентов помещается непрозрачный экран с резким краем (если необходим крутой передний фронт лазерного импульса на выходе стретчера). Спектральные компоненты, идущие на переднем фронте импульса, будут резко обрезаться. Это приведет к крутому переднему фронту импульса излучения на выходе стретчера. Крутизна переднего фронта, по-видимому, будет определяться спектральным составом импульса на выходе стретчера и составит  $\tau_{\text{фр}} \leq 1$  пс [11]. Таким же образом, поместив экран со стороны коротковолновых спектральных компонентов, можно обрезать и задний фронт, получив квазипрямоугольный импульс. Если вблизи поворотного зеркала поместить специально изготовленную маску с заданным профилем пропускания, то на выходе стретчера будет получен профилированный импульс.

Сделаем оценки возможностей вырезания импульса длительностью  $\tau_{0,5} \approx 1,6$  нс с крутыми передним и задним фронтами. Зависимость фазы  $\Phi$  импульса излучения от времени  $t$  на выходе стретчера дается выражением [11]

$$\Phi(t) = \omega_0 t + \alpha t^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – скорость чирпа,  $\omega_0$  – центральная частота волны.

Частота  $\omega$  импульса будет иметь линейный по времени чирп

$$\omega(t) = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \omega_0 + 2\alpha t. \quad (2)$$

Отсюда зависимость длины волны от времени дается выражением

$$\lambda(t) = c \sqrt{\left( \frac{c}{\lambda_0} + \frac{\alpha t}{2\pi} \right)}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света,  $\lambda_0$  – центральная длина волны.

Скорость чирпа  $\alpha$  можно определить, задавшись длительностью импульсов на входе  $\tau_{\text{фс}}$  и выходе  $\tau_{\text{стр}}$  стретчера

$$\alpha = 2\pi A / (\tau_{\text{фс}} \tau_{\text{стр}}), \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{фс}}$  – длительность фемтосекундного импульса,  $\tau_{\text{стр}}$  – длительность чирпированного импульса после стретчера,  $A \approx \tau_{\text{фс}} \Delta v$  – константа, зависящая от формы импульса;  $\Delta v$  – частотная ширина спектра. Для гауссова импульса  $A \approx 0,44$ .

На рис. 2 приведена рассчитанная по формулам (3) и (4) зависимость длины волны чирп-импульса на выходе стретчера от времени при  $\lambda_0 = 1054$  нм;  $A = 0,44$ ;  $\tau_{\text{фс}} = 250$  фс;  $\tau_{\text{стр}} = 1,65$  нс. Там же приведена гауссова временная форма лазерного импульса на выходе стретчера.

Длительность лазерного импульса на выходе стретчера в случае резкого обрезания переднего и заднего фронтов зависит от уровня обрезания спектра. Как показали эксперименты по усилению чирп-импульса в усилительных системах на неодимовом фосфатном стекле [13–15], при усилении с энергией  $E_{\text{вх}} \approx 1$  нДж до  $E_{\text{вых}} \approx 1$  кДж происходит сужение спектральной ширины импульса до  $\Delta\lambda_{\text{вых}} \approx 3$ –4 нм. Близкое значение было получено и в наших экспериментах. Поэтому для получения резких фронтов можно обрезать спектр импульса до  $\Delta\lambda \approx 3$  нм. Как видно из рис. 2,

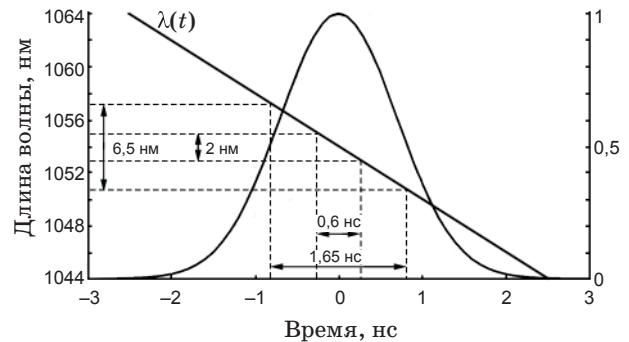


Рис. 2. Зависимость длины волны в чирп-импульсе от времени при  $\tau_{\text{фс}} = 250$  фс,  $\tau_{\text{стр}} = 1,65$  нс.

при обрезании спектральных компонентов до  $\Delta\lambda \approx 2$  нм длительность квазипрямоугольного импульса составит  $\tau_{0,5} \approx 0,6$  нс.

Установка, на которой проводились экспериментальные исследования получения круtyх ( $\tau_{0,5} \approx \tau_{0,1-0,9} \leq 100$  пс) переднего и заднего фронтов лазерного импульса, состояла из задающего генератора GLX-200 с длительностью импульса  $\tau_{0,5} \approx 250$  фс и шириной спектра излучения  $\Delta\lambda = 6,5$  нм, с центральной длиной волны, регулируемой в пределах от 1053 нм до 1058 нм, стретчера и регенеративного усилителя. Регистрацию спектра осуществляли с помощью спектрометра фирмы Ocean Optics HR4000 (точность измерений 0,1 нм). Схема стретчера приведена на рис. 1. Стретчер построен по четырехпроходной схеме с одной дифракционной решеткой размером  $180 \times 110$  мм и числом штрихов  $1700 \text{ mm}^{-1}$ .

Лазерный импульс после стретчера усиливается в кольцевом регенеративном усилителе (рис. 3). Активной средой регенеративного усилителя, применяемого в экспериментах, является неодимовое фосфатное стекло.

Для ввода импульса в регенеративный усилитель применяется ячейка Поккельса ЯП1 с окном пропускания длительностью 8 нс. Поляризационные зеркала с малым пропусканием “чужой” поляризации ( $T_s < 0,2\%$ ) и ячейка Поккельса ЯП2 с регулируемой длительностью окна пропускания, в сочетании с полуволновой пластинкой, обеспечивают требуемое число проходов импульса по усиливающей среде и вывод излучения из резонатора. В момент инжектирования лазерного импульса в резонатор на ячейке Поккельса ЯП2 напряжения нет. После прохождения полуволновой пластинки плоскость поляризации излучения поворачивается на  $90^\circ$ ,

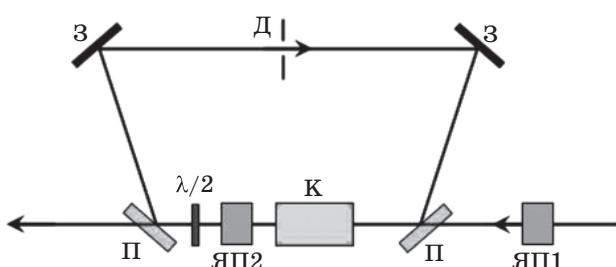


Рис. 3. Оптическая схема регенеративного усилителя. ЯП1 – ячейка Поккельса с окном пропускания 8 нс; П – поляризационное зеркало; З – зеркало; Д – диафрагма; К – кванtron; ЯП2 – ячейка Поккельса с регулируемым окном пропускания.

пучок отражается от поляризационных зеркал и остается в резонаторе. Для того чтобы оставить излучение в резонаторе (для обеспечения необходимого числа проходов), на ячейку Поккельса ЯП2 подается полуволновое напряжение перед приходом на нее импульса второй раз, и излучение становится запертым внутри резонатора. После совершения необходимого числа проходов напряжение ячейки Поккельса ЯП2 сбрасывается и импульс излучения выводится из резонатора.

Внутри резонатора усилителя располагается селектирующая диафрагма. Диаметр этой диафрагмы и длина резонатора определяют размеры пучка в соответствующих точках оптической схемы и его расходимость. При длине резонатора  $L = 300$  см и размещении диафрагмы диаметром  $2R = 1,5$  мм на выходе из активной среды пучок, продифрагировавший на ней и сделавший один обход резонатора, на входе в активную среду будет иметь число Френеля  $N_\Phi = R^2/\lambda L \approx 0,2$ . То есть на вход активной среды поступает дальняя зона пучка и мы можем работать с центральной, гладкой частью пучка (кружок Эйри) диаметром  $D \approx 2,44 \times (\lambda/2R) \times L \approx 5$  мм. Эта же диафрагма обеспечивает уровень угловой селекции  $\theta_{\text{сел}} \approx 2R/L \approx 5 \times 10^{-4}$  рад. Дифракционные потери компенсируются высоким коэффициентом усиления активной среды. Для подавления импульсов, прошедших через выходное поляризационное зеркало от различных проходов, на выходе регенеративного усилителя помещается затвор Поккельса.

Оптическая схема регенеративного усилителя обеспечивает размер пучка в активном элементе, при котором интеграл распада не превышает критического значения. Дифракционное качество пучка на выходе усилителя сохраняется.

Усиление происходит с уровня энергии  $E_{\text{вх}} \approx 0,05$  нДж до  $E_{\text{вых}} \approx 5$  мДж (за 21 проход) в режиме слабого сигнала ( $K_0 \approx 7$  на проход), то есть физический коэффициент усиления достигал  $(K_0)^{21} \approx 5,6 \times 10^{17}$ . Пропускание оптического тракта  $T \approx 0,34$  на проход. Технический коэффициент усиления составлял  $K_{\text{ус}} = E_{\text{вых}}/E_{\text{вх}} = (K_0 T)^{21} \approx 10^8$ .

Измерения временной формы лазерных импульсов проводили на осциллографе Tektronix DSO80604B с полосой 6 ГГц и датчиком ДФДМШ-70-06 с полосой пропускания 5 ГГц. Аппаратную функцию этих приборов измеряли при помощи фемтосекундного излучения на выходе задающего генератора GLX-200. При

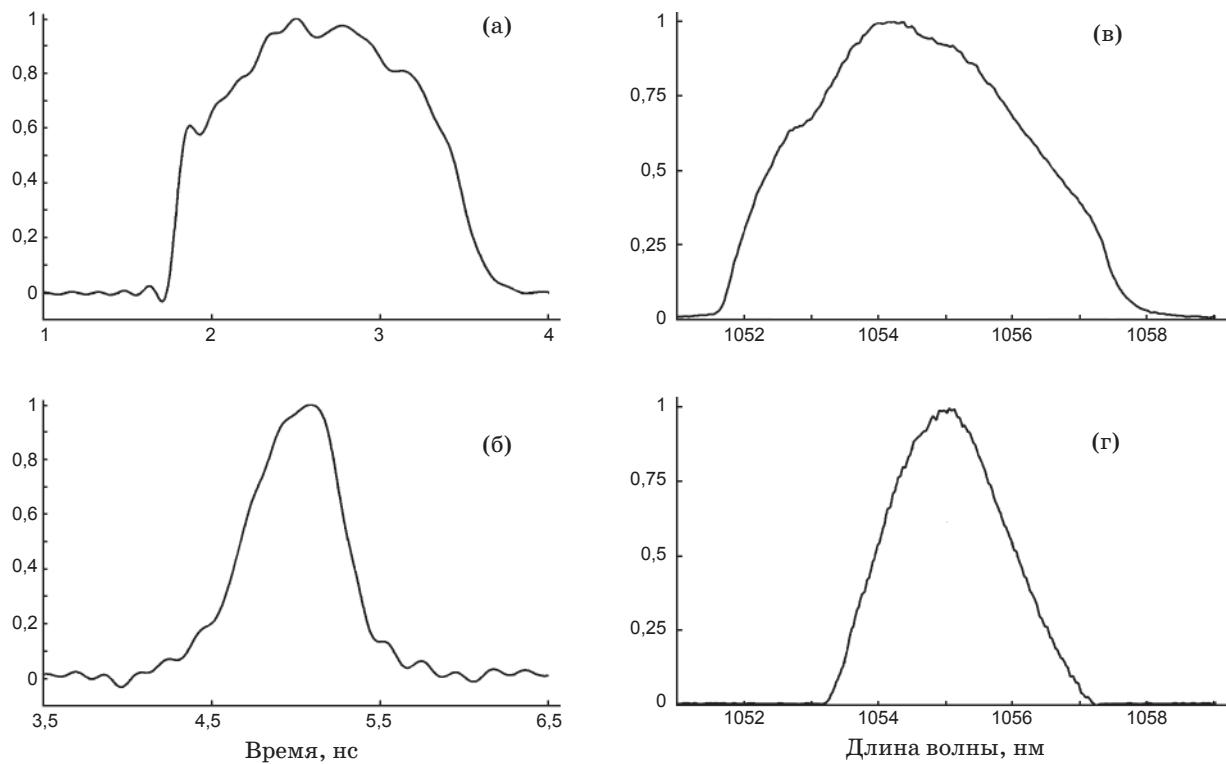


Рис. 4. Временная форма непрофилированного импульса (а, б) и его спектр (в, г) до усиления (а, в) и после усиления (б, г) в регенеративном усилителе. Модуляция временной формы на вершине импульса вызвана дефектами дифракционной решетки стретчера.

отклике на сверхкороткий импульс длительность переднего фронта и длительность импульса по полувысоте составляли  $(\tau_{0,1-0,9})_{\text{ап}} \approx (\tau_{0,5})_{\text{ап}} \approx 100$  пс.

Исследования спектрального профилирования лазерного импульса и получение круtyх фронтов  $\tau_{\text{фр}} \approx \tau_{\text{ап}} \approx 100$  пс проводили в два этапа: сначала измеряли спектр и длительность импульса на выходе стретчера, затем после усиления – в регенеративном усилителе. Было проведено три серии измерений.

Сначала измерялись параметры исходного, непрофилированного, импульса до и после усиления. На рис. 4а временная форма исходного импульса не имеет гауссову форму из-за обрезания части излучения на краях дифракционной решетки. При усиении сужение спектра с  $\Delta\lambda_{0,5} \approx 4,2$  нм до  $\Delta\lambda_{0,5} \approx 2,2$  нм привело к уменьшению длительности усиленного импульса с  $\tau_{0,5} \approx 1,6$  нс до  $\tau_{0,5} \approx 0,6$  нс.

Вторая серия экспериментов проводилась с вырезанным передним фронтом. На рис. 5а видно, что путем обрезания части длин волн в красной области спектра в стретчере сформирован крутой передний фронт с длительностью по-

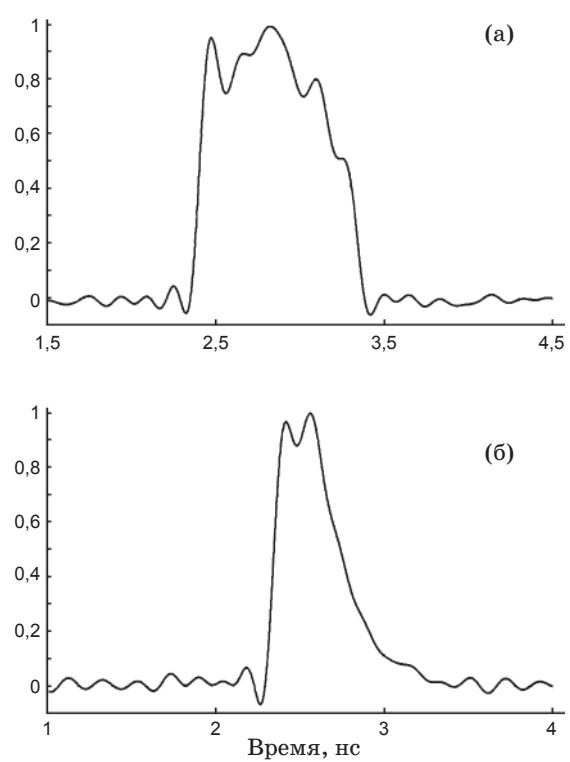


Рис. 5. Временная форма импульса с вырезанным передним фронтом до (а) и после (б) усиления в регенеративном усилителе.

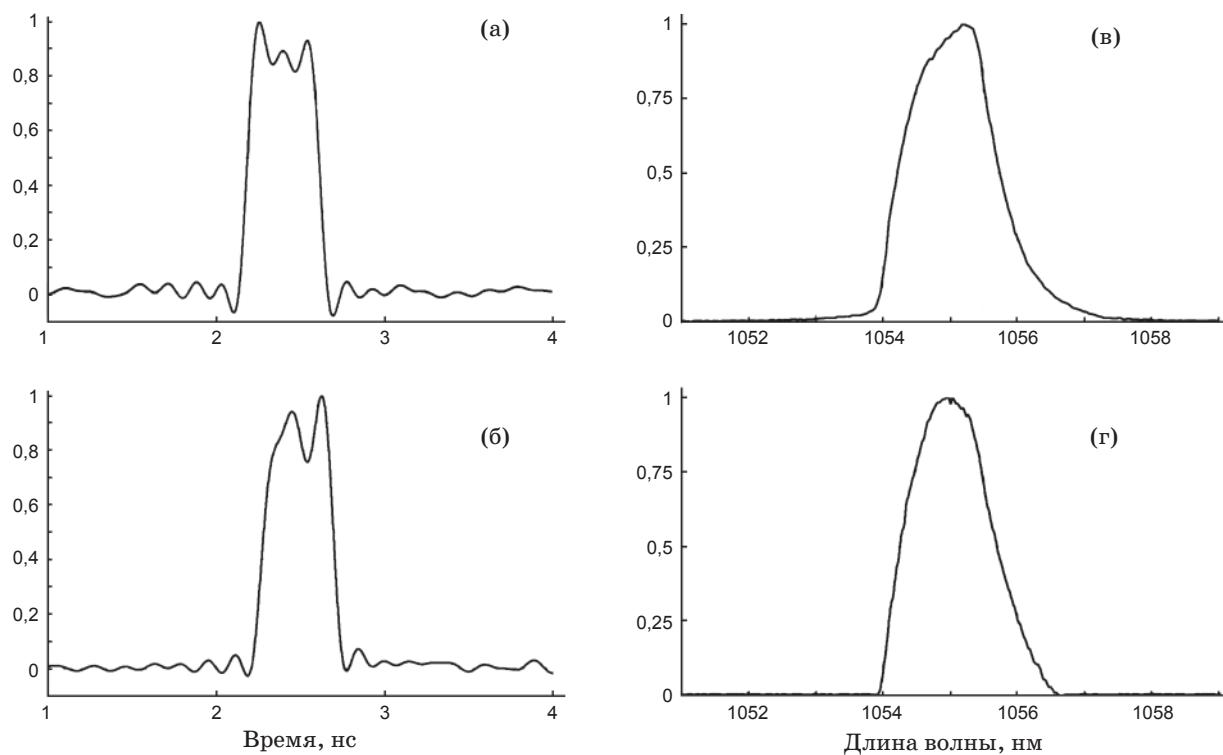


Рис. 6. Временная форма импульса (а, б) и его спектр (в, г) с вырезанными передним и задним фронтами до усиления (а, в) и после усиления (б, г) в регенеративном усилителе.

рядка аппаратной функции (менее 90 пс), и после усиления он сохраняется неизменным (рис. 5б).

В третьей серии экспериментов на выходе стретчера был сформирован импульс длительностью  $\tau_{0,5} \approx 430$  пс с крутыми (длительностью порядка аппаратной функции) передним и задним фронтами с шириной спектра  $\Delta\lambda_{0,5} \approx 1,5$  нм (рис. 6). После усиления его форма, передний и задний фронты остались практически без изменений. Спектральный состав импульса также практически не изменился.

Таким образом, была проведена экспериментальная проверка временного и спектрального профилирования наносекундного импульса чисто пассивными устройствами в стретчере путем помещения на разложенном после первого отражения от дифракционной решетки в спектр пучке соответствующей маски. На выходе стретчера получены крутые передний и задний фронты лазерного импульса, а также квазипрямоугольный импульс. Экспериментально показано, что при значительном ( $6 \times 10^{17}$  раз) усилении чирпированного импульса с резким передним фронтом не происходит затягивания фронта, по крайней мере, в пределах аппаратной функции измерительной системы  $\tau_{\text{ап}} \approx 100$  пс, и сохраняется

квазипрямоугольная временная форма импульса при ширине спектра  $\Delta\lambda_{0,5} \approx 1,5$  нм.

Работа выполнена при частичной поддержке МНТЦ (проект № 3683) и РФФИ (проект № 09-02-12157).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Burkhardt S.C., Penko F.A. Temporal Pulse Shaping of Fiber-Optic Laser Beams // ICF quarterly report, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-LR-105821-96-2. P. 75–81.
2. Малинов В.А., Чернов В.Н. Формирование лазерных импульсов дефлекторными кристаллами // Квант. электрон. 1980. V. 17. С. 586–588.
3. Wallace J. Laser Pulse delivers ignition-sized punch // Laser Focus World. August 2003. P. 24–28.
4. Shaw M., Williams W., House R., Haynam C. Laser performance operation model // Opt. Engin. 2004. V. 43. P. 2885–2889.
5. Crane J.K., Wilcox R.B., Hopps N.W. Integrated operations of the National Ignition Facility (NIF) optical pulse generation development system // SPIE. 2003. V. 100. P. 3492–3495.
6. Jolly A., Gleyze J.F., Luce J., Coic H., Deschaseaux G. Front-end sources of the LIL-LMJ fusion lasers:

- progress report and prospects // Opt. Engin. 2003. V. 42. P. 1427–1432.
7. *Wilcox R.B., Van Wonteghem B.M., Burkhardt S.C., Davin J.M.* Multiple-Beam Pulse Shaping and Preamplification // Proceedings of the I.A.E.A. technical committee meeting on drivers for inertial confinement fusion. 1994. P. 91–100.
8. *Burkhardt S.C., Beach R.J., Crane J.H.* The National Ignition Facility Front-End Laser System // SPIE Proceedings Series. "First Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion". 1995. V. 48 P. 2633–2637.
9. The OMEGA Laser Pulse-Shaping System // LLE Annual Report, University of Rochester Laboratory for Laser Energetics. 1995. P. 56–61.
10. A High-Bandwidth Electrical-Waveform Generator Based on Aperture-Coupled Striplines for OMEGA Pulse-Shaping Applications // Quarterly Report, University of Rochester Laboratory for Laser Energetics. 1997. V. 73. P. 1.
11. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 240 с.
12. *Крюков П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов // Квант. электрон. 2001. Т. 95. С. 31–36.
13. *Stuart B.C., Perry M.D., Miller J.* 125-TW Ti:sapphire/Nd:glass laser system // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 242–246.
14. *Perry M.D., Pennington D., Stuart B.C.* Petawatt laser pulses // Opt. Lett. 1999. V. 160. P. 24–28.
15. *Kitagawa Y., Fujita H., Kodama R.* Petawatt Laser Construction // Annual Progress Report. Institute of Laser Engineering. Osaka University. 2000. P. 3–4.
-